



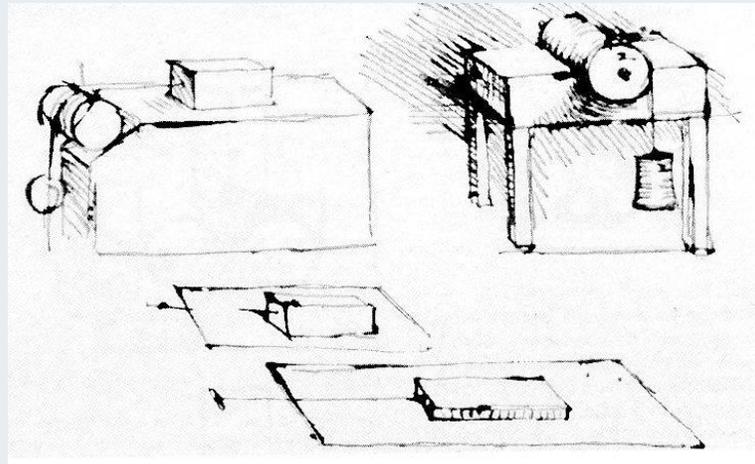
# Partikel - Fluch und Segen in der Tribologie

Thomas Benen, Microtrac GmbH  
Hannover Messe, 25.04.2018

# Was ist Tribologie?

## Definition

- **Tribologie** (Reibungslehre, von [altgriechisch](#) τρίβειν *tribein*, deutsch ‚reiben, abnutzen‘ und λόγος *lógos*, hier: ‚Lehre‘) befasst sich mit der wissenschaftlichen Beschreibung von [Reibung](#), der Berechnung und Messung von [Reibungskoeffizienten](#), dem [Verschleiß](#) und der erforderlichen [Schmierung](#) zwischen aufeinander einwirkenden, in Relativbewegung befindlichen Oberflächen.



Tribologische Versuche von  
Leonardo da Vinci

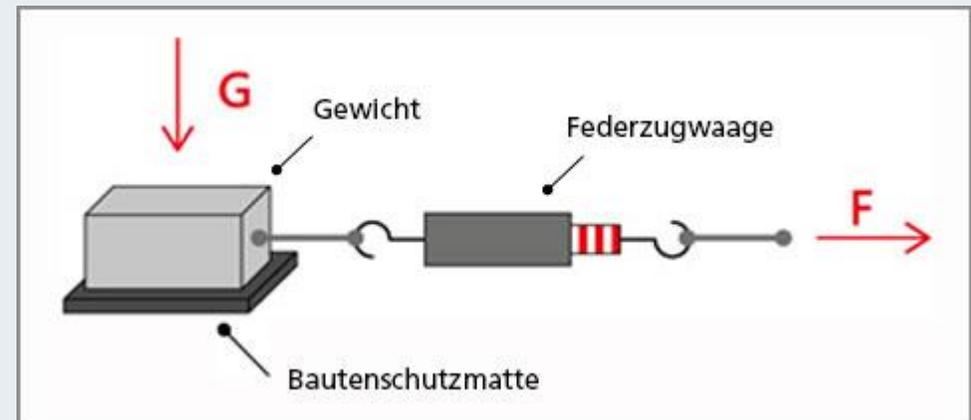
# Was ist Tribologie?

## Aufgaben der Tribologie

- Die Tribologie untersucht Reibung, Schmierung und Verschleiß von [Lagern](#), [Führungen](#), [Getrieben](#), [Motoren](#) und anderen [Maschinenelementen](#). Neben der Entwicklung geeigneter Schmierstoffe stehen Fragen der Werkstoffauswahl, der Oberflächenbehandlung und -beschichtung und der Oberflächentopografie im Vordergrund aktueller Entwicklungen. Neben den Fragestellungen im Maschinenbau gibt es zahlreiche weitere Gebiete, bei denen Reibung und Verschleiß von großer Bedeutung sind, beispielsweise bei [Endoprothesen](#).



Guillaume Amontons  
Amontons'sche Gesetze  
 $F = \mu \cdot N$   
mit Reibungskoeffizient  $\mu$



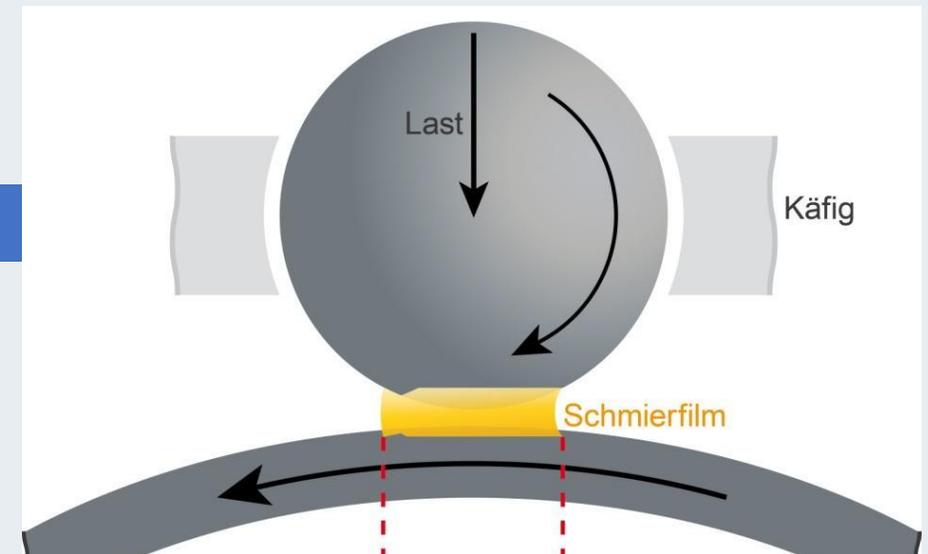
# Wie lässt sich das Ergebnis eines Verschleissvorgangs messen?

## Messung des Festkörperverschleißes

- Gravimetrie: Bestimmung des Abriebs durch Auswiegen vorher/nachher
- Inspektion mit optischer Mikroskopie
- Konfokalmikroskopie, Laserscanning
- Tastmessgeräte
- Elektronenmikroskopie, Computertomographie
- und weitere

## Messung im Schmierfilm

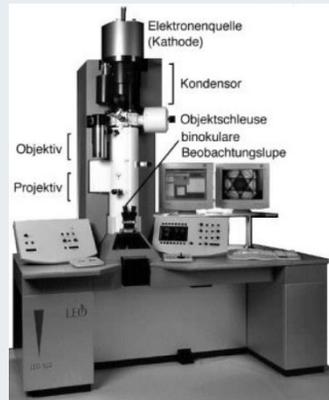
- Spurenanalytik
- Partikelmesstechnik
- und weitere



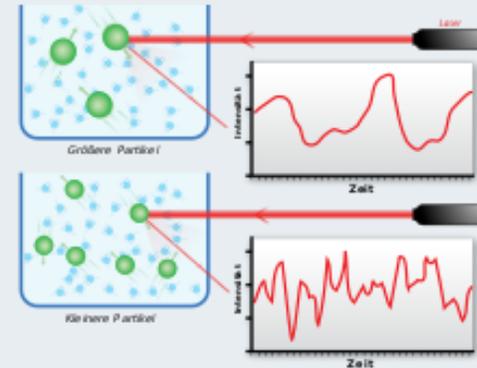
# Die am weitesten verbreiteten Partikelmesstechniken

Größenbereich	Einzelpartikel-Techniken	Ensemble-Techniken
Nanometer	Elektronenmikroskopie (EM)	Dynamische Lichtstreuung (DLS)
Mikrometer	Optische Mikroskopie (OM)	Laserbeugung (LD) / statische Lichtstreuung (SLS)

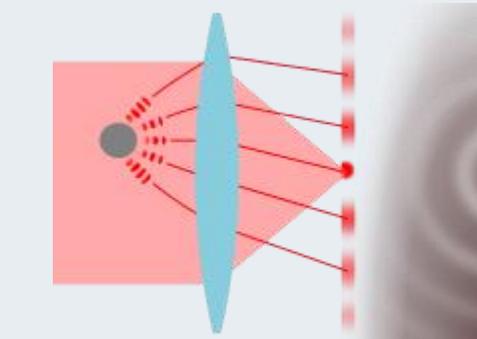
EM



OM



DLS

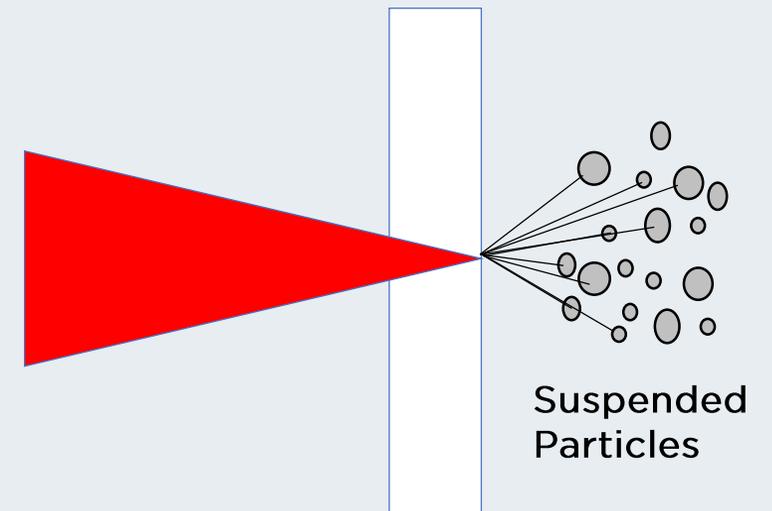
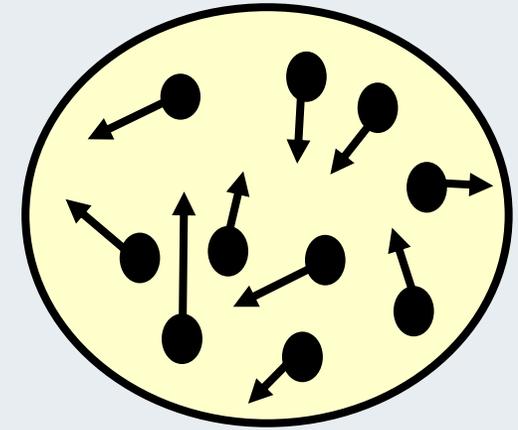


SLS

# Dynamische Lichtstreuung - Konzept

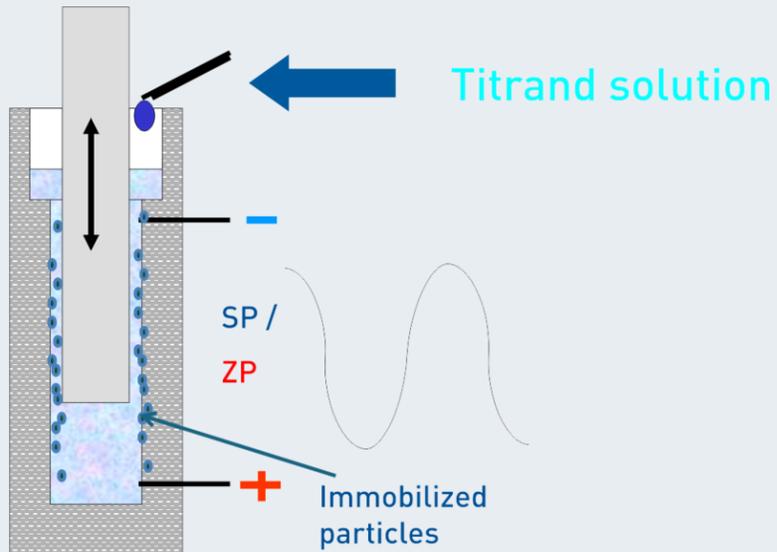
- Partikel in Suspension bewegen sich in Brownscher Bewegung
- Geschwindigkeit ist abhängig von der Partikelgröße
- Doppler-Shift des gestreuten Lichts durch bewegte Teilchen
- Detektion bei  $180^\circ$  bietet größtmöglichen Konzentrationsbereich

Technik der Wahl für Nanopartikel in Suspension



# Messung von Nanopartikel-Größenverteilung und -Ladung

Titration, Zeta Potential und  
Größenmessung, in derselben Zelle

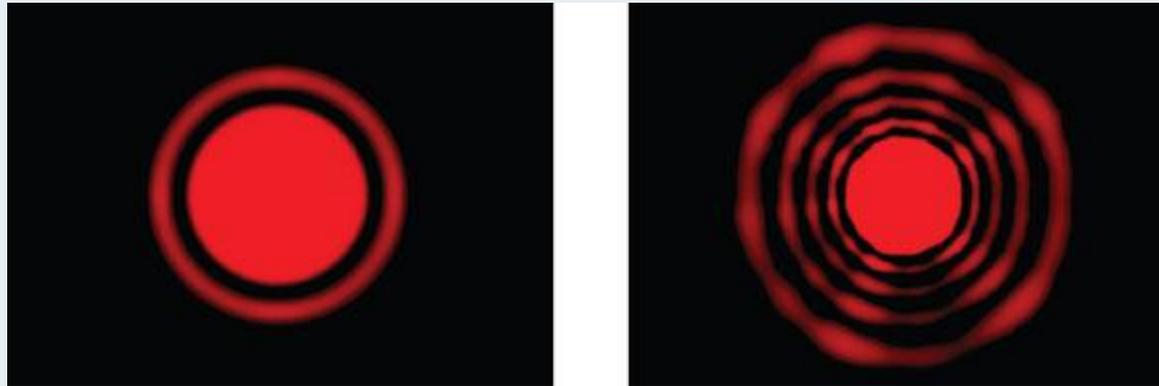


Messzelle mit oszillierendem Stößel.  
Partikel adsorbieren  
→ Strömungspotential →  
Oberflächenladung (Zeta-Potential)



DUO aus Stabino + NanotracsFlex

# Laserbeugung / statische Lichtstreuung - Konzept



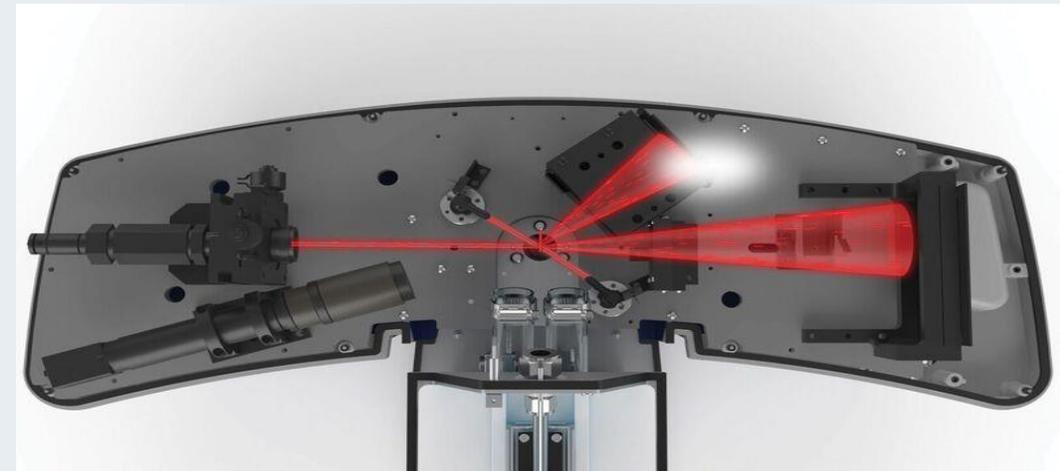
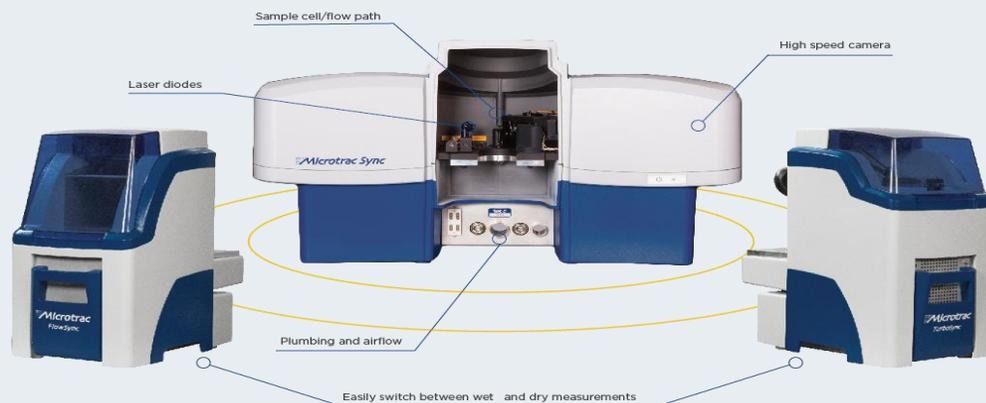
Streubild großer Partikel

Streubild kleiner Partikel

- Partikel werden trocken oder nass mit Laser bestrahlt
- Große Partikel streuen in kleinen Winkeln, Kleine Partikel in hohe Winkel
- Das winkelabhängige Streulicht wird von logarithmisch angeordneten Detektoren erfasst
- Hohe Winkel ( $165^\circ$ ) erlauben Messung von 10 nm bis mehrere mm
- Die Partikelgrößenverteilung wird nach Gustave Mie berechnet

# Sync: Integration von Laserbeugung und Dynamischer Bildanalyse

- Laserbeugung – Industriestandard bei der Messung von Mikropartikeln
- Gibt Volumenäquivalent (Massenverteilung) an
- Dynamische Bildanalyse / DIA: Dynamic Image Analysis
- Gibt Partikelform und -zahl an
- SYNC: beide Techniken auf einer optischen Bank, mit einer Messzelle

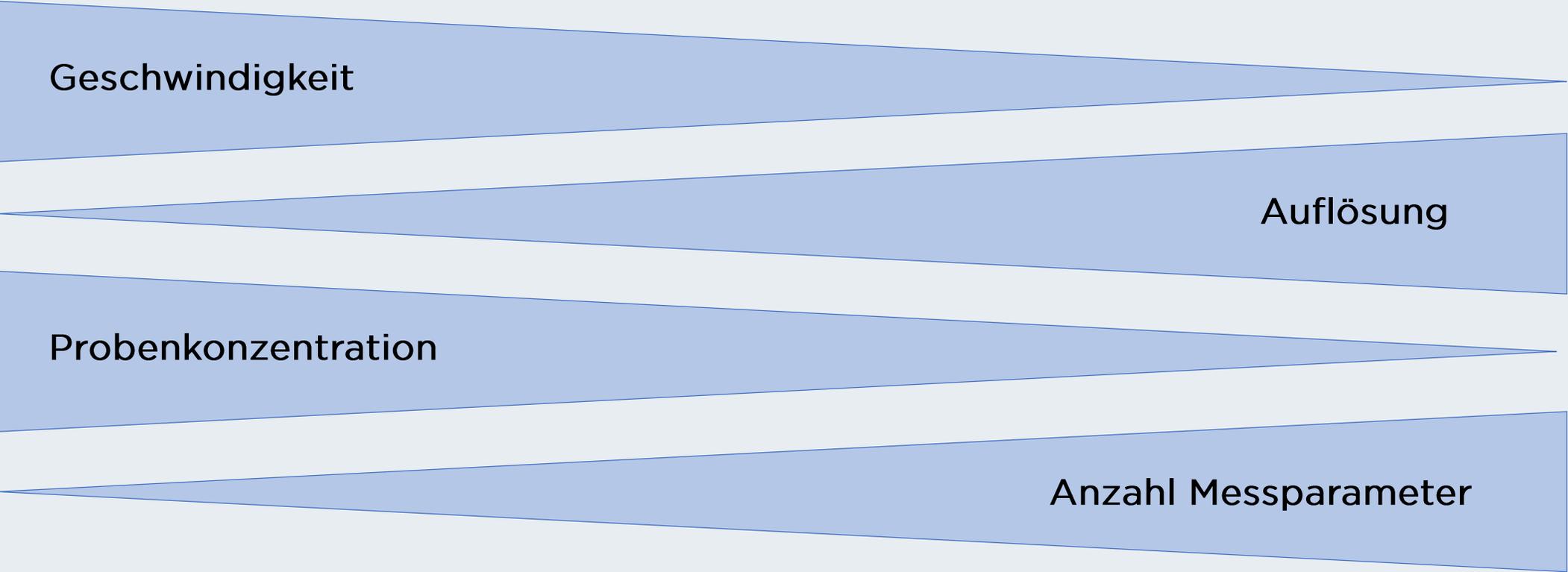


# Partikelmesstechniken: Vor- und Nachteile

Generell gilt:

Ensemble-Techniken

Einzelpartikel-Techniken



# Mikrostrukturveränderungen technischer Oberflächen

Beispiel Metalloberfläche

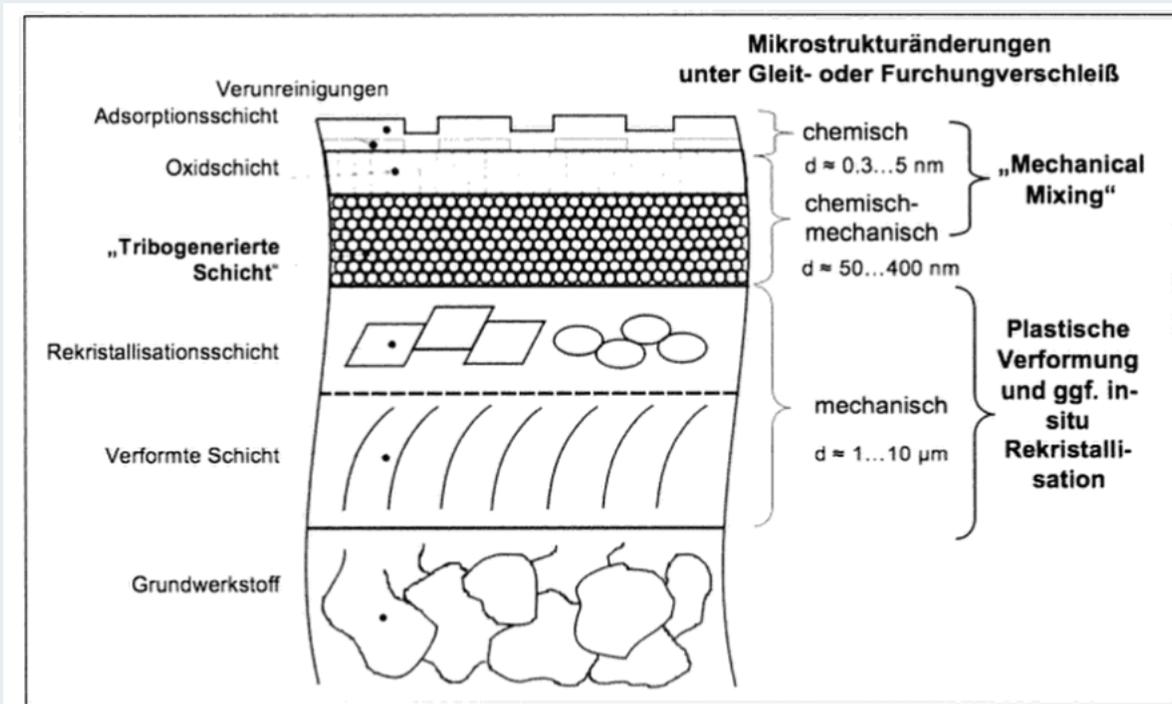
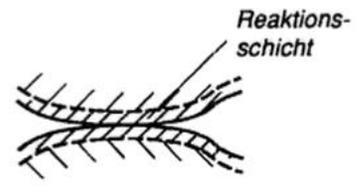
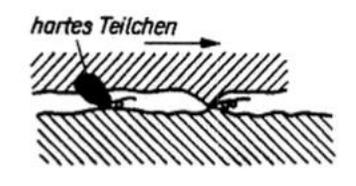
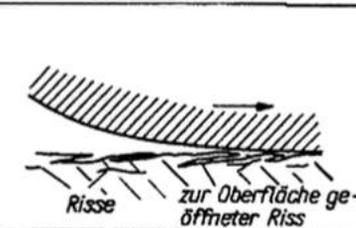
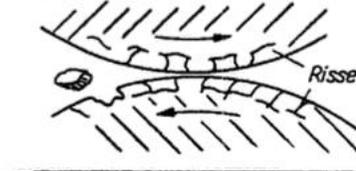
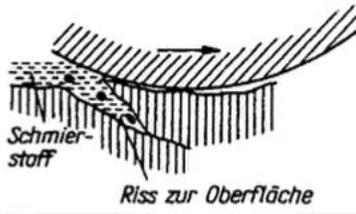


Bild 5.4.1 (a) Mikrostrukturänderungen unter Gleit- oder Furchungverschleiß, vgl. Bild 3.1.1

Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik von Horst Czichos, Karl-Heinz Habig, Springer 2015.

# Verschleißpartikelbildung unter Gleitverschleiß

Verschleißmechanismus	Entstehungsprozess	Partikel- form	Partikel- kennzeichnung
Tribochemische Reaktionen (+ Abtrennprozesse)			(a) pulverförmig bzw. amorph
Abrasion (Mikrospanen)			(b) spiral- bzw. spanförmig
Oberflächenzerrüttung (Delamination)			(c) schuppen- bzw. lamellenförmig
Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)			(d) splitterförmig
Kontaktdeformation Triboschmelzen			(e) kugelförmig

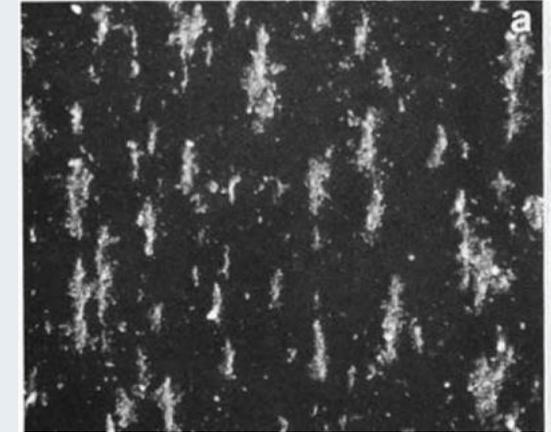
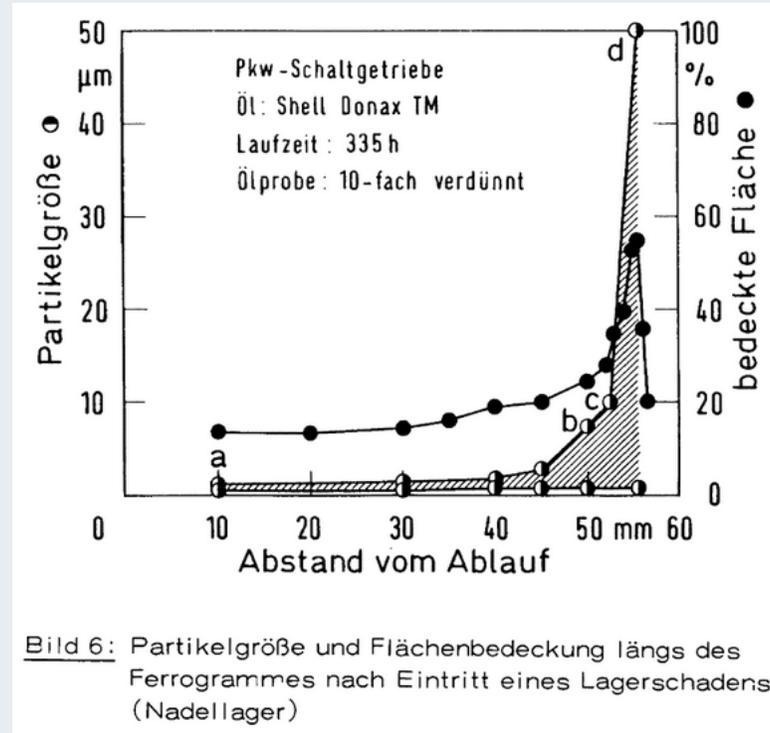
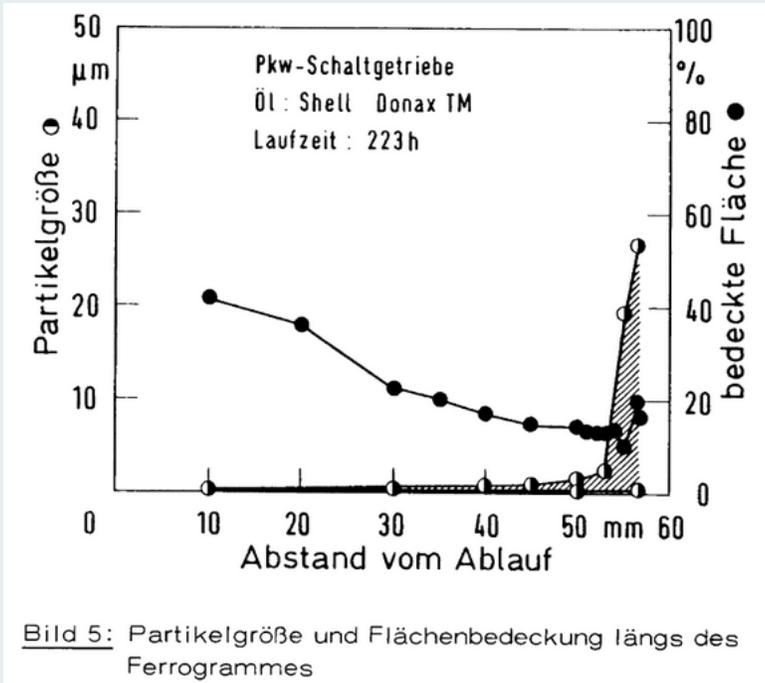
Beispiel Metalloberfläche

Tribologie-Handbuch: Tribometrie,  
Tribomaterialien, Tribotechnik  
von Horst Czichos, Karl-Heinz Habig,  
Springer 2015.

Bild 5.4.1 (b) Schematische Darstellung von Verschleißpartikeln (VP) und ihre Entstehung

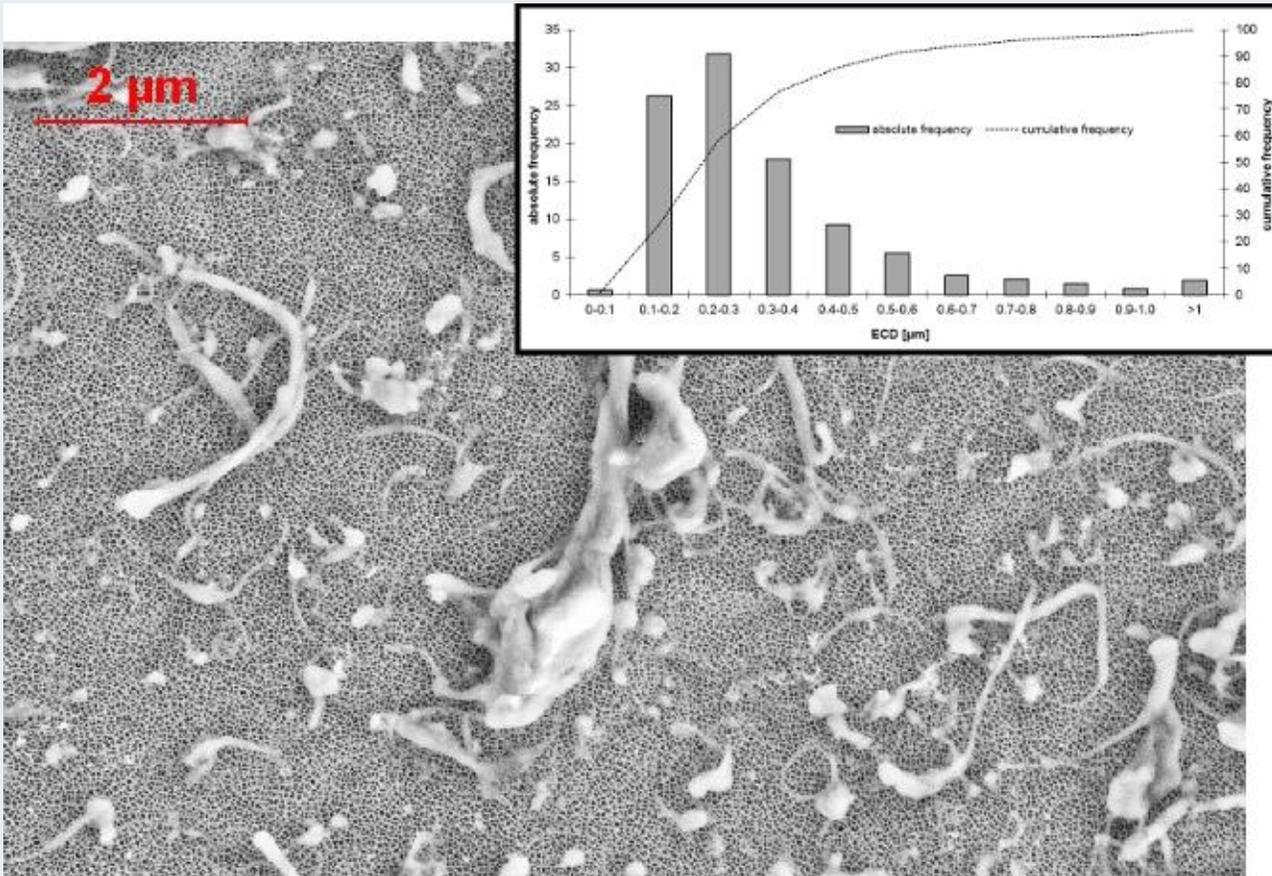
# Verschleißpartikelbildung in einem Getriebe

Beispiel Abriebpartikel in PKW-Schaltgetriebe



Meß- und Prüfverfahren ·  
 Betriebsverhalten von  
 Reibungssystemen ·  
 Eigenschaften von Motorenölen  
 Springer 1983

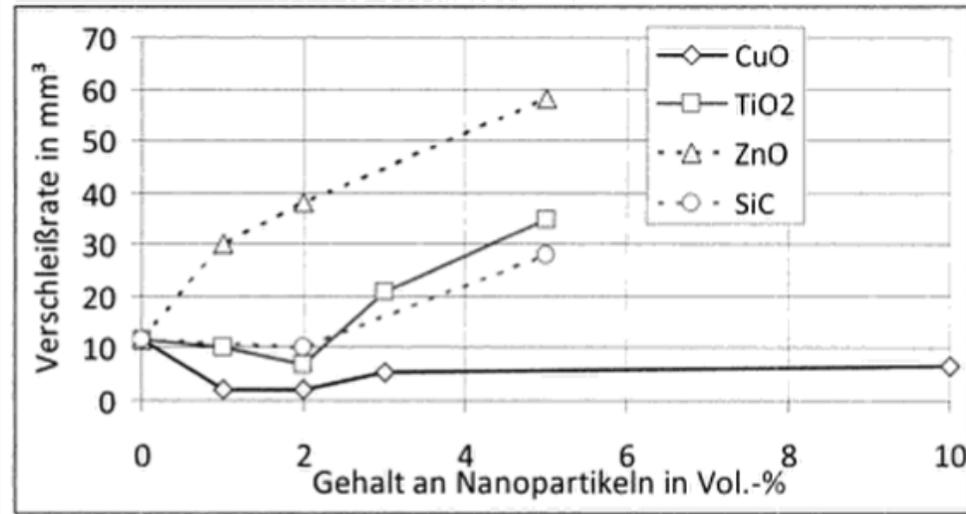
# Implantat-Abrieb in Gewebeflüssigkeit



- Um die Verschleißpartikel zu charakterisieren ist es notwendig das aufzulösen. Dies geschieht in Abhängigkeit von den zu isolierenden Partikeln (zum Beispiel Polyethylene, Keramik, Metall) mit sauren, basischen oder enzymatischen Aufschlusstechniken.
- Die Charakterisierung der Partikel nach Größe, Morphologie (zum Beispiel Rundheit oder Längen-Breiten Verhältnis) und Anzahl erfolgt nach normierten Standards (ISO 17853; ASTM F 1877).
- Ref: Labor für Biomechanik und Implantatforschung, Uniklinikum Heidelberg

# Verstärkung von Kunststoffen mit Partikeln

- Reibfläche von Polyphenylensulfid (PPS) auf Stahl
- Nanopartikel aus Metalloxiden oder Carbiden wurden in den Kunststoff eingearbeitet
- CuO und TiO<sub>2</sub> Partikel verbesserten die Abriebeigenschaften
- Optimum liegt bei 1-3 Volumenprozent
- Füllstoffe übernehmen die Spannungen und Polymere die Dehnungen



**Bild 9.12.16**

Volumetrische Verschleißraten von nanopartikelverstärktem PPS nach 35 km Verschleißweg gegen Stahl ( $v=1$  m/s, nominelle Flächenpressung 0,65 MPa,  $R_a=0,1$   $\mu\text{m}$ ) nach Bahadur und Sunkara (2005)

Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik von Horst Czichos, Karl-Heinz Habig, Springer 2015.

# Verbesserung von Schmierfilmen durch Nanopartikel

Wear Protection for Wind Turbines

VGB

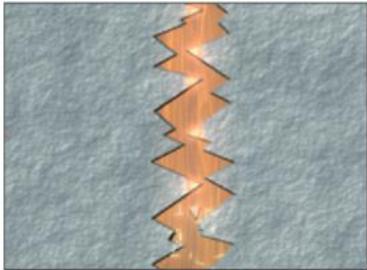


Figure 1. Friction and pressure in engines and gearboxes generates high temperatures on metal surfaces that trigger the chemical bonding process of REWITEC.

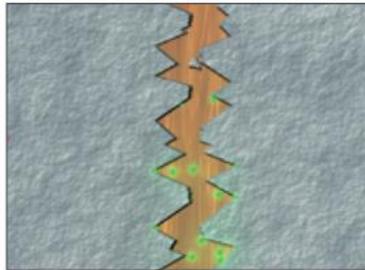


Figure 2. The soft nanoparticles remove dirt from the rubbing metal surfaces and react with the metal atoms to form a smooth and protective layer on the surface.

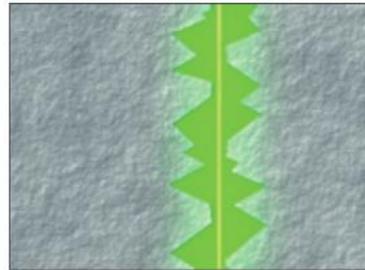


Figure 3. The final result is a new and very smooth metal surface structure. These properties, in turn, give the machine more power, higher efficiency and longer life.

- Partikel aus MoS<sub>2</sub> oder Keramik als Additiv von Schmiermitteln
- Verringern die Reibung durch Anhaften an die Reibflächen, und „Versiegelung“ von unebenen Flächen
- Zuerst eingesetzt bei Windrädern und Schiffsmotoren

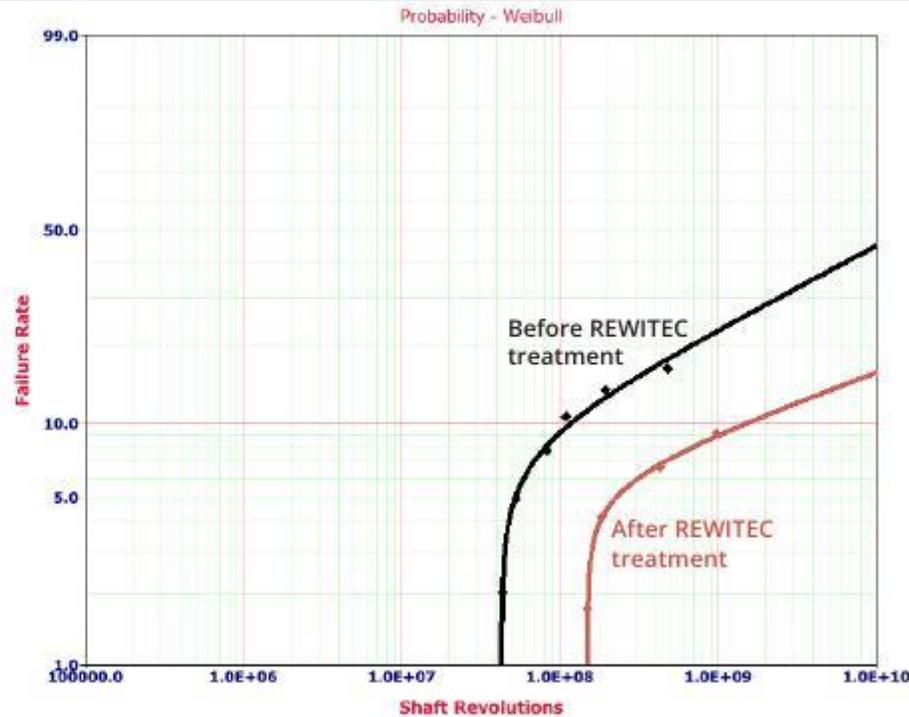
Reconditioning and Durable Wear Protection for Gear Boxes and Bearings in Wind Turbines, VGB Powertech 9/2009



# Verbesserung von Schmierfilmen durch Nanopartikel

Component	Simulation	Life, L50
Intermediate Pinion Bearing	Baseline	16.6 yrs
	Rewitec	> 50 yrs
	<b>Life Extension</b>	<b>&gt; 3</b>
Planetary Bearing	Baseline	4.3 yrs
	Rewitec	14.2 yrs
	<b>Life Extension</b>	<b>3.3</b>

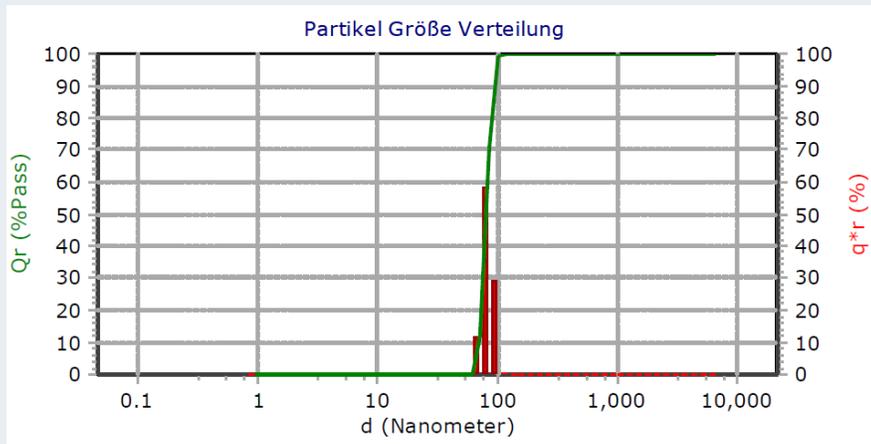
Component	Simulation	Life, L50
Intermediate Pinion Gear	Baseline (damaged)	2.7 yrs
	Rewitec	6.9 yrs
	<b>Life Extension</b>	<b>2.6</b>



Quelle: [www.rewitec.de](http://www.rewitec.de)

# Verbesserung von Schmierfilmen durch Nanopartikel

d(nm)	Vol%	Width
81.1	100	17.69



Universität Bielefeld, Institut für Physik,  
Silikat- Nanopartikel zur Reibungsminderung,  
Testmessung mit Microtrac's NanotracsFlex, 2017

- Partikel aus Keramik / Metallsilikaten als Additiv von Schmiermitteln
- Partikel liegen typischerweise zwischen 50 und 100 nm
- auch für Automotoren kommerziell verfügbar



# Contact

Microtrac GmbH, Krefeld, Germany  
Microtrac Inc, Montgomeryville, PA, USA

thomas.benen@Microtrac.com

[www.microtrac.com](http://www.microtrac.com)